



Revista EIA

ISSN: 1794-1237

revista@eia.edu.co

Escuela de Ingeniería de Antioquia

Colombia

Aiassa, Gonzalo M.; Arrúa, Pedro A.
DISEÑO DE MEZCLAS DE SUELO COMPACTADO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE TERRAPLENES
Revista EIA, núm. 7, junio, 2007, pp. 51-61
Escuela de Ingeniería de Antioquia
Envigado, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=149216939004>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

DISEÑO DE MEZCLAS DE SUELO COMPACTADO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE TERRAPLENES

GONZALO M. AIASSA*
PEDRO A. ARRÚA**

RESUMEN

El desempeño de terraplenes destinados a obras de pavimento en carreteras o pistas de aeronaves depende del comportamiento de los materiales empleados en las diferentes capas estructurales del pavimento. En general, las limitaciones económicas imponen la utilización del suelo superficial disponible como materia prima fundamental en la construcción. La mejora de este suelo mediante compactación y la incorporación de material granular o estabilizador constituye una estrategia indispensable para lograr materiales adecuados a las necesidades. En este trabajo se ha realizado un estudio de comportamiento mecánico sobre un suelo limo-arenoso y se ha evaluado la aptitud para su empleo como material de sub-base. El suelo limo-arenoso empleado corresponde al tipo de suelo que constituyen los estratos superficiales de gran parte de la región central de Argentina, en particular en el sur de la provincia de Córdoba. La caracterización mecánica se ha realizado en laboratorio mediante la ejecución de ensayos de compresión no confinada y CBR, sobre muestras compactadas de suelo-cemento y de suelo granular. Los resultados han permitido caracterizar los materiales empleados y concluir sobre su desempeño al ser utilizados para la construcción de capas de suelo compactado destinadas a sub-bases de pavimentos.

PALABRAS CLAVE: pavimento flexible; limo arenoso; mejoramiento de suelos; comportamiento mecánico.

* Ingeniero Civil. Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención en Estructuras y Geotecnia. Profesor Adjunto, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional.
gaiassa@scdt.frc.utn.edu.ar

** Ingeniero Civil. Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención en Estructuras y Geotecnia. Profesor Adjunto, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional.
parrua@cbasicas.frc.utn.edu.ar

ABSTRACT

The highways or airfield pavement performance depends on the material behavior in different structural layers of embankment. Generally, economic limitations force to use of *in situ* available soil as material for pavement construction. The improvement of soil by compaction and mixture with granular or stabilizing material is an adequate strategy. In this work, a study of mechanical behavior of silty-sand soil has been made, and the aptitude of use it as sub-base material has been evaluated. The soil analyzed corresponds to superficial layers in the central region of Argentina (southern zone of Cordoba province). The mechanical characterization has been made in laboratory, with unconfined compression and CBR tests on compacted soil-cement and soil-granular material. The results has shown materials characterization and concluding of the use and performance on compacted soil sub-base pavements construction.

KEY WORDS: flexible pavement; silty-sand; soil improvement; mechanical behavior.

INTRODUCCIÓN

La construcción de sub-bases y bases de carreteras o pistas de aeronaves requiere un conocimiento geotécnico detallado de los materiales involucrados. En general, se utilizan principalmente materiales disponibles en el sector de emplazamiento de la obra, sobre los que se aplican técnicas de mejoramiento de suelos con el objetivo de mejorar su comportamiento^{1,2} y disminuir los espesores de diseño en cada una de las capas que forman el pavimento³.

En la zona central de Argentina, los suelos predominantes corresponden a formaciones loésicas. Estos suelos son depositados por acción eólica y se encuentran compuestos principalmente por limo y fracciones variables de arena y arcilla. Corresponden al grupo de suelos inestables colapsables, los cuales, bajo acción aislada o combinada de incrementos de

humedad o estado tensional, pueden experimentar grandes deformaciones que generan daños significativos sobre las estructuras que sustentan⁴. La mejora mediante compactación de este tipo de suelo ha sido estudiada para evaluar el comportamiento mecánico e hidráulico de barreras de limos loésicos compactados⁵.

En este trabajo se presenta un estudio del desempeño de materiales combinados para ser empleados como sub-base de carreteras o pistas, con el objetivo de disminuir el espesor de base, incluso de reducirlo a los mínimos reglamentarios. El material utilizado para mejorar, mediante compactación y mezcla de áridos o estabilizantes, corresponde a un típico suelo limo-arenoso superficial de la región central de Argentina, de la zona sur de la provincia de Córdoba. Con este suelo, se confeccionaron muestras a partir de efectuar combinaciones en diferentes

¹ FOUNDATION ENGINEERING HANDBOOK. 2. ed. Hsai-Yang Fang. Van Nostrand Reinhold Book, New York, 1991.

² BOWLES, J. Foundation analysis and design. 3. ed. McGraw-Hill, 1982.

³ GUNAY, Y.; AYDILEK, A. and DEMIRKAN. Geoenvironmental behavior of foundry sand amended mixtures for highway subbases. Waste Management, Elsevier, 26:932-945, 2006.

⁴ ARRÚA, P. Teoría de probabilidad en el análisis del comportamiento de fundaciones profundas. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. N01/0690, 2006.

⁵ AIASSA, G. Comportamiento de barreras de limo compactado bajo condición de infiltración. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. N01/0693, 2006.



proporciones con material granular seleccionado y, por otro lado, se prepararon muestras estabilizadas con diferentes porcentajes de cemento Pórtland. Sobre las muestras de suelo-granular se realizaron ensayos para definir la relación de soporte de California (CBR), y sobre las muestras de suelo-cemento se realizaron ensayos de compresión no confinada. Los resultados obtenidos han mostrado la influencia tanto de mezclas como estabilizaciones sobre el suelo compactado. Siguiendo las especificaciones de un método de diseño de pavimentos para carreteras, se ha podido establecer su influencia en la definición de espesores de bases.

PAVIMENTOS FLEXIBLES

Consideraciones generales

Convencionalmente se acepta que los pavimentos flexibles son aquellos que presentan una base semirrígida sobre la cual se construye una capa de rodamiento constituida por una mezcla bituminosa de derivados del petróleo. No existe una terminología única para la designación de las capas constituyentes del pavimento. En este trabajo, se emplearán los siguientes términos, (a) pavimento: estructura que descansa sobre el suelo de fundación, formada por sub-base, base y capa de rodamiento (figura 1), (b) sub-base: material seleccionado e instalado mediante una técnica específica, colocado sobre el terreno de fundación, (c) base: materiales pétreos, mezclas de suelo-cemento o mezclas bituminosas colocadas sobre la sub-base, (d) capa de rodamiento: superficie bituminosa superior^{6,7}.

La funcionalidad de la estructura del pavimento se encuentra altamente relacionada con el comportamiento de cada una de sus componentes. La sub-base debe permitir el drenaje, controlar los

cambios de volumen del terreno de fundación y controlar la ascensión capilar proveniente del agua subterránea, evitando de este modo deformaciones no admisibles. Generalmente se acepta que el material de sub-base corresponde a tipos de suelo A-1 o A-2, según clasificación D-3282 de la ASTM⁸.

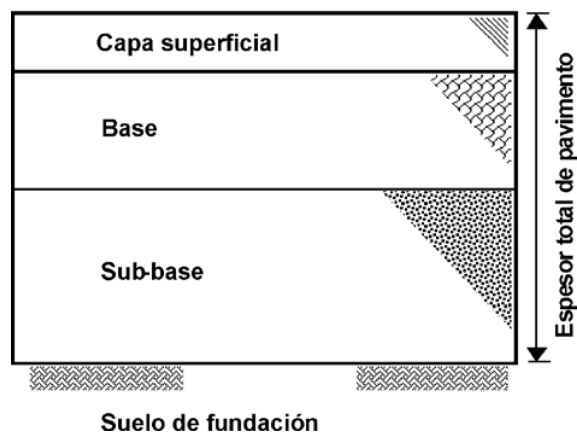


Figura 1. Estructura típica de pavimento flexible

Las cargas transmitidas por los vehículos serán tomadas principalmente por la base. Esta capa deberá distribuir los esfuerzos de manera más o menos uniforme sobre la capa de sub-base. Se requiere estabilidad dimensional ante cambios de temperatura y humedad. Se admiten materiales con bajos índices de plasticidad ($< 6\%$), con límite líquido menor que 25%. La relación de soporte de California (CBR) para la capa de base se recomienda que sea superior a 50%.

El diseño de pavimento flexible exige suficiente compactación de la sub-rasante (suelo de fundación) para prevenir asentamientos diferenciales no admisibles bajo cargas de tránsito y con adecuado drenaje de la estructura. Por otro lado, se debe

⁶ RODAS, V. Carreteras, calles y aeropistas. Caracas, Venezuela, 2. ed., 1954.

⁷ USACE. Airfield flexible pavement mobilization construction. EM 1110-3-141, 1984.

⁸ ASTM. American Society for Testing and Materials. Annual Books of Standards, 2001.

establecer un espesor adecuado de pavimento sobre la sub-rasante y sobre cada capa componente de la estructura, junto con una selección cuidadosa de los materiales utilizados.

Procedimiento de diseño

El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE) propone un procedimiento de diseño para pavimentos flexibles que considera aspectos específicos del lugar de emplazamiento y criterios económicos⁹. Este método se basa en la consideración de la magnitud, composición del tráfico y vida útil de la estructura, lo cual se considera por medio del denominado índice de diseño. Para el diseño que involucra vehículos con rueda de goma, el tránsito se clasifica en tres grupos: (1) vehículos de pasajeros y camionetas, (2) camiones de dos ejes y (3) camiones de tres, cuatro y cinco ejes. En función de la composición del tráfico se agrupan cuatro categorías (figura 2). El índice de diseño se obtiene como una relación entre la categoría y el tipo de carretera, según se establece en EM 1110-3-130¹⁰ (figura 3).

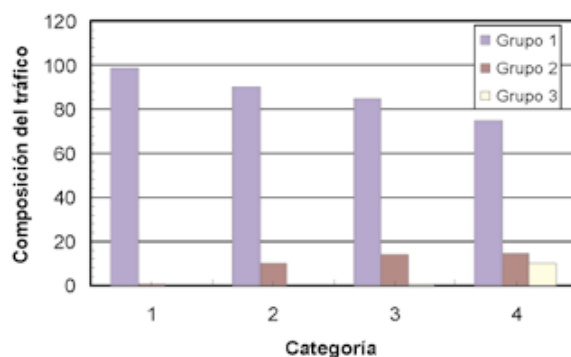


Figura 2. Composición de tráfico por categoría

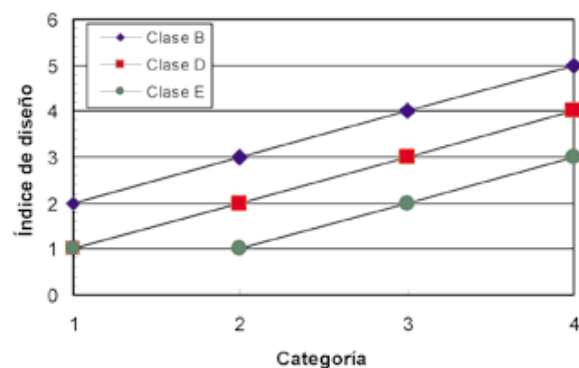


Figura 3. Definición de índice de diseño

La determinación del espesor de diseño del pavimento se realiza en función del comportamiento del suelo, caracterizado por el CBR o resistencia no confinada, y el índice de diseño (figura 4). Si se emplean materiales estabilizados en alguna de las capas, puede reducirse el espesor requerido. El diseño de pavimentos con capas estabilizadas, por ejemplo,

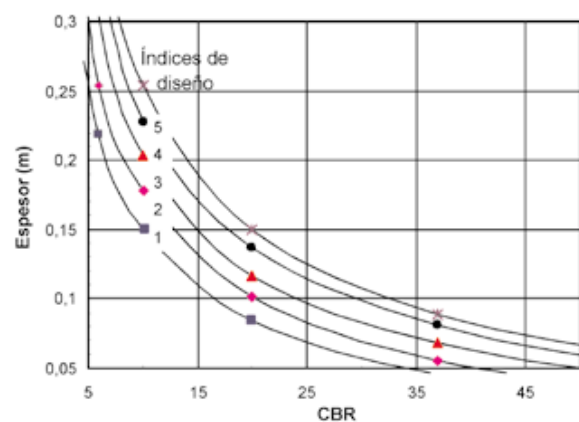


Figura 4. Espesores de diseño (modificado de USACE)

⁹ USACE. Flexible pavements for roads, streets, walks, and open storage areas. EM 1110-3-131, 1984.

¹⁰ USACE. Geometrics for roads, streets, walks, and open storage areas. EM 1110-3-130, 1984.



mediante el agregado de cemento, requiere la aplicación de factores de equivalencia a una capa o capas de material convencional. El factor de equivalencia representa el espesor de material convencional que puede sustituirse por un espesor unitario de material estabilizado. El factor de equivalencia para un material estabilizado con cemento o limo se determina mediante el empleo de la figura 5.

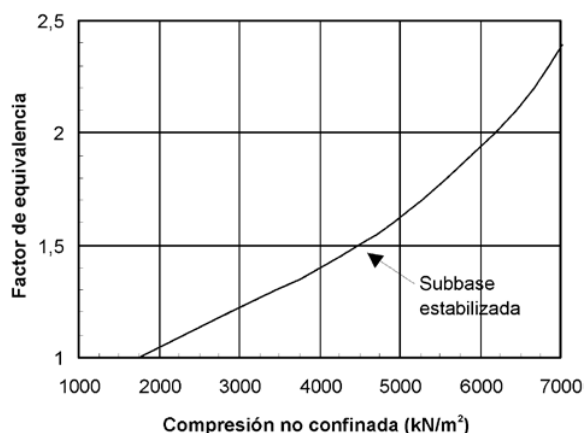


Figura 5. Relación entre resistencia a compresión no confinada y factor de equivalencia (modificado de USACE)

MATERIALES Y MÉTODOS

Suelo

El material que ha sido empleado como componente principal (suelo en estado natural) corresponde a un suelo limo-arenoso color marrón oscuro cuya humedad natural es del 17% (ASTM D-2216). Los pasantes de tamiz N.º 4 (T4) y de tamiz N.º 200 (T200) son de 99,4% y 23,7% respectivamente (ASTM D-422). Según el Sistema de Clasificación Unificada de Suelos (USCS) le corresponde la denominación SM. Como material de aporte para la confección de muestras de suelo-granular se ha empleado una arena color marrón amarillento con humedad natural del 3,1%, con pasantes T4: 99,4% y T200: 0%. Su clasificación según USCS es SP. Las curvas granulométricas de estos materiales se presentan en la figura 6.

Para los fines de conocer los valores de densidad máxima para una energía especificada del suelo limo arenoso, se han ejecutado ensayos de compactación para establecer la relación entre el peso unitario seco y el contenido de humedad gravimétrica. El ensayo de compactación corresponde al

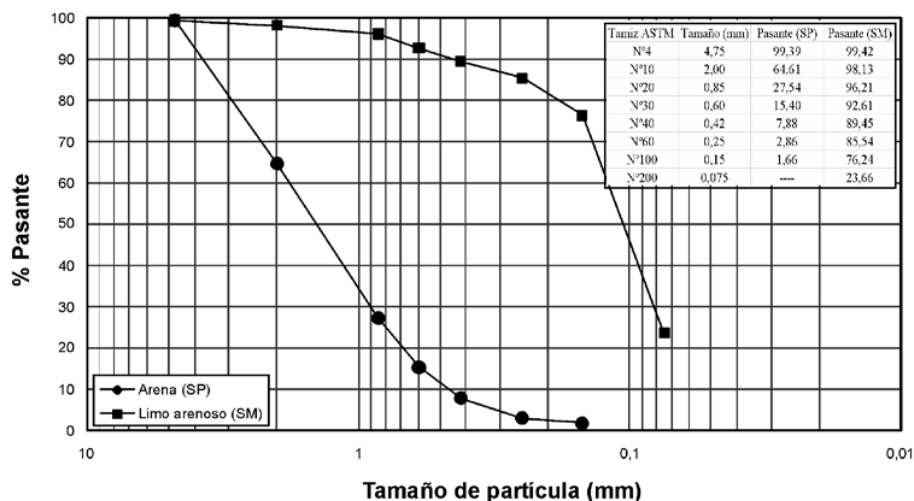


Figura 6. Curva granulométrica del material principal y de aporte para las mezclas

Proctor estándar (ASTM D-698). La figura 7 muestra los resultados obtenidos. Nótese que la humedad de compactación óptima es del 12,5% y puede lograrse un peso unitario seco máximo de 17,4 kN/m³ para esta energía. Por lo general las especificaciones para material de sub-base exigen una combinación de restricciones físicas (granulometría, peso unitario mínimo) y mecánicas (resistencia al corte no drenado, CBR, módulo de elasticidad, número de golpes del ensayo de penetración dinámico de cono, entre otros) del suelo que se emplea. Con el objetivo de satisfacer la norma existente, se deben establecer mezclas que cumplan con estos requisitos.

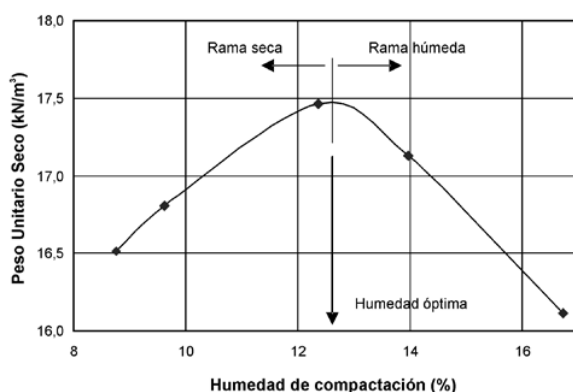


Figura 7. Relación entre humedad de compactación y peso unitario seco en suelo limo-arenoso (energía Proctor estándar)

Mezclas suelo-granular y suelo-cemento

El suelo SM (limo-arenoso), en estado natural, resulta altamente deformable al ser sometido a las condiciones de sollicitación que debe resistir durante la vida útil de la carretera. En consecuencia, no es recomendable su utilización como material de sub-base, a pesar de lo cual es posible mejorar sus propiedades adicionando en proporciones adecuadas otros materiales. Este mejoramiento resulta en una disminución del paquete estructural (espesor de la base) y en beneficios económicos.

Diversas son las alternativas que permiten mejorar este tipo de material. Es posible diseñar combinaciones con aglomerantes (cemento, cal o material bituminoso) o con suelos arenosos adicionados en diferentes porcentajes en peso y evaluando su resistencia. En el caso de suelo mejorado con estabilización mediante cemento, se propone evaluar la resistencia al corte por medio de ensayos de compresión simple (compresión no confinada), mientras que para muestras de suelo-granular, mezcla entre suelo limo-arenoso y arenas se propone realizar ensayos de relación de soporte de California (CBR) sin inundación de la muestra. La realización de ensayos sobre muestras sometidas a inundación por un período de tiempo o sobre muestras con humedad de compactación dependerá de las condiciones ambientales y de los requisitos particulares del proyecto. En este estudio se realizaron los ensayos CBR sobre las muestras con humedad de compactación, sin inundación previa. La tabla 1 muestra las proporciones en peso que han sido utilizadas en la combinación de materiales para la construcción de muestras compactadas de suelo granular y suelo-cemento. Las muestras confeccionadas con cemento fueron curadas durante 7 días, impidiendo la evaporación mediante películas selladas de polietileno.

Tabla 1. Diseño de muestras

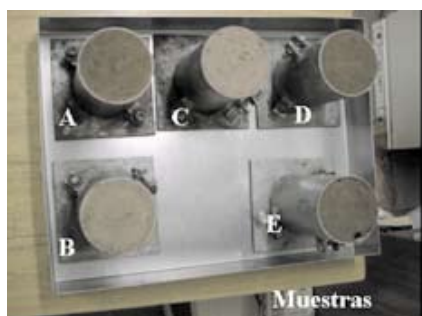
Suelo-granular (SM-SP)	Suelo-cemento (SM-C°)
100% SM - 0% SP	97% SM - 3% C°
80% SM - 20% SP	95% SM - 5% C°
60% SM - 40% SP	93% SM - 7% C°
40% SM - 60% SP	90% SM - 10% C°

Ensayo de compresión no confinada

Las muestras de suelo-cemento han sido compactadas a humedad óptima y energía Proctor estándar, con diferentes porcentajes de cemento. Las probetas se han confeccionado con una relación



dimensional 2/1 (altura/diámetro). Adicionalmente se ha preparado una muestra compactada de control con el 0% de contenido de cemento. El ensayo se ha efectuado mediante una prensa motorizada con velocidad de avance constante de 1,27 mm/min, con retención de carga máxima en rotura o fluencia. En la figura 8, se aprecia el contraste para los diferentes contenidos de cemento. La designación adoptada se presenta anexa a la figura.



Muestra	C° (%)
D	0
E	3
A	5
B	7
C	10

Figura 8. Muestras ensayadas a compresión no confinada

Relación de soporte de California (CBR)

Para evaluar la resistencia de las diferentes mezclas se han efectuado ensayos CBR (*California Bearing Ratio*) (ASTM D-1883) sobre muestras compactadas con humedad óptima al 100% de la energía Proctor estándar, de acuerdo con las especificaciones indicadas en la tabla 1. Los ensayos se realizaron con las muestras en condición de humedad de compactación sin inundación previa, con el fin de representar en laboratorio adecuadamente las condiciones a las que se encontrará sometido el material en el sitio. Para la ejecución del ensayo se ha empleado la prensa descrita en el apartado anterior, con los accesorios necesarios para su correcta ejecución. La figura 9 muestra una vista del dispositivo de medición de deformación y de las celdas de carga para la adquisición de datos, junto con las muestras al final del ensayo.

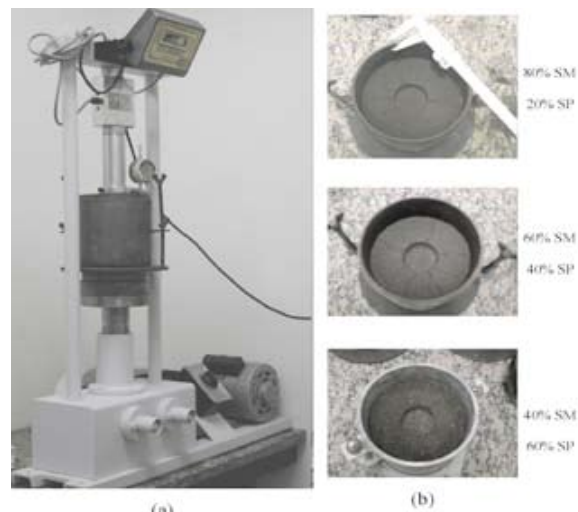


Figura 9. Ensayo típico para la Relación de Soporte de California en suelos compactados en laboratorio.
(a) Prensa motorizada y dispositivos de medición.
(b) Muestras al final del ensayo

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se confeccionaron tres muestras de suelo granular en diferentes proporciones de los suelos limo-arenoso y arena. Los resultados de los análisis granulométricos en cada una de las muestras y para los materiales componentes se presentan en la figura 10. Por otro lado, se muestran límites recomendados por ASTM para el diseño de base y sub-base. Se observa que, en general, las mezclas obtenidas satisfacen los requisitos reglamentarios, con excepción de la mezcla 01 (20%SP-80%SM) que se aleja ligeramente, debido a que posee un mayor contenido de material fino.

Todas las mezclas se prepararon mediante compactación en la energía Proctor estándar y humedad óptima. Para esto, previamente se caracterizaron las relaciones peso unitario seco y humedad en cada una de las mezclas. Los resultados de esta caracterización, junto con las muestras construidas para los ensayos de compresión simple y CBR con suelo-cemento y suelo granular, se presentan en la figura 11.

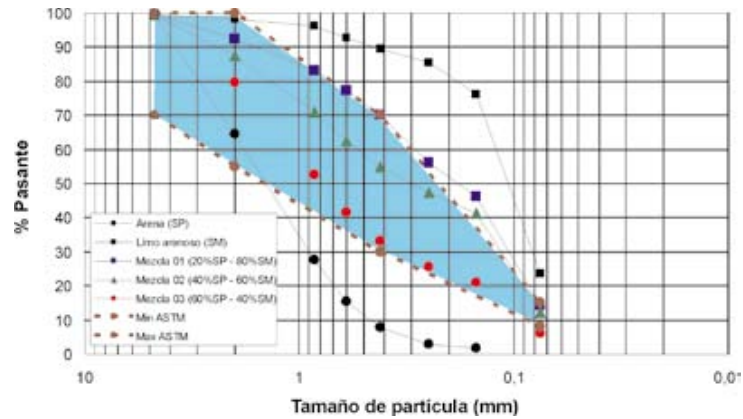


Figura 10. Granulometría de mezclas suelo granular

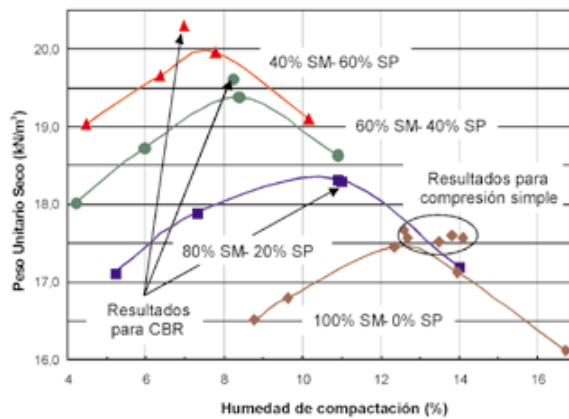


Figura 11. Compactación de mezclas suelo granular y suelo-cemento

En la figura 12 se presenta la relación entre tensión y penetración del pistón, para el ensayo CBR sobre las mezclas suelo-granular compactadas. Se observa un comportamiento más rígido y un mayor valor en la tensión final en la muestra 03, con mayor contenido de arena (40%SM-60%SP). Este comportamiento se refleja en un mayor valor para la relación de soporte de California, a medida que se incrementa el contenido de material granular (arena, SP). La definición del CBR se realiza a partir de la relación entre la tensión de referencia, correspondiente a la

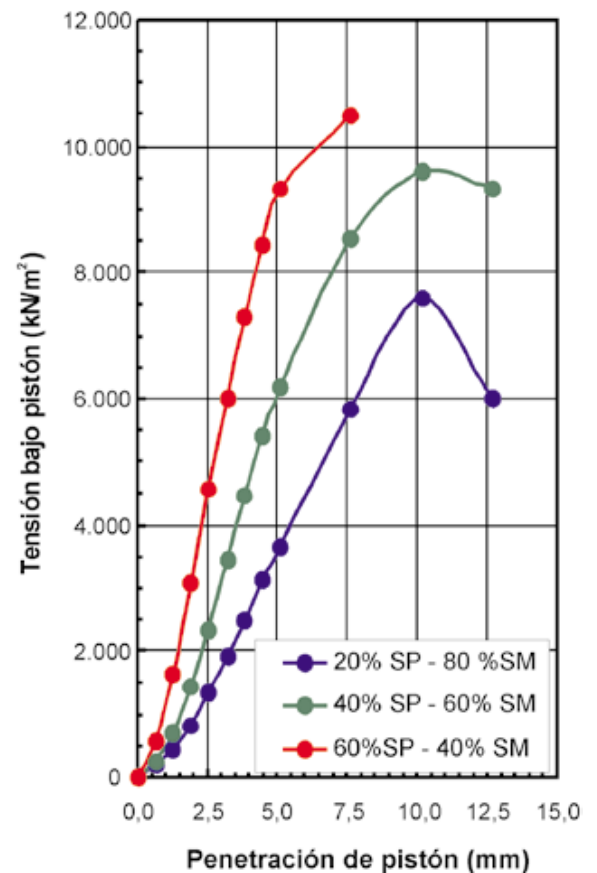


Figura 12. Tensión-deformación en ensayo CBR



tensión necesaria para una penetración del pistón igual a 0,1 pulgada (2,54 mm), y la tensión estándar de 6,9 MPa.

Los resultados obtenidos en el suelo-granular permiten construir una curva de diseño (figura 13). En esta figura se relacionan: porcentaje de arena, CBR y densidad seca máxima, para la energía de compactación Proctor estándar y con humedad óptima. En general, los pliegos de especificaciones técnicas establecen valores mínimos de CBR para el material componente de una capa determinada; de esta forma, mediante el empleo de las curvas presentadas en la figura 13, pueden establecerse tanto el porcentaje de arena necesario para incorporar al suelo limo-arenoso para lograr un valor específico de CBR como la densidad seca máxima del material compactado, con el fin de efectuar los controles de compactación en campo.

Los resultados de compresión no confinada en las muestras de suelo-cemento se presentan en la figura 14. Se observa un incremento en la resistencia con aumentos en el porcentaje de cemento incorporado al suelo. No obstante, el incremento de resistencia tiende a disminuir para mayores porcentajes de cemento. Los resultados permiten obtener el factor de equivalencia (figura 5) y de esta forma reducir los espesores de las capas que sean estabilizadas con cemento.

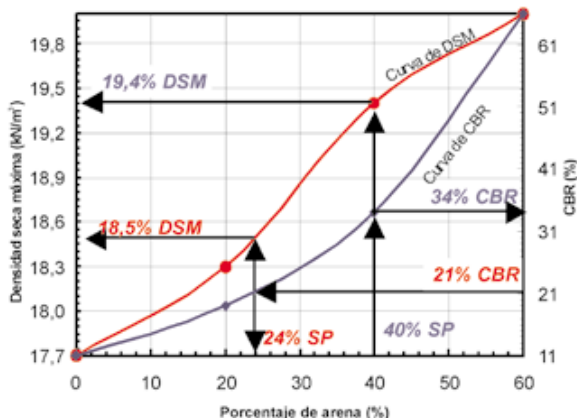


Figura 13. Curva de diseño suelo granular

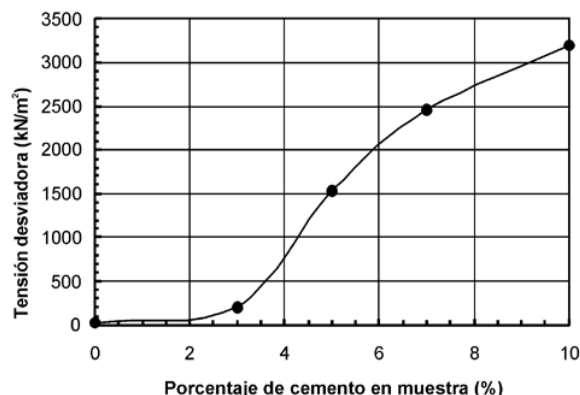


Figura 14. Resistencia a compresión no confinada en suelo-cemento

DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

Conocido el CBR de la mezcla de suelo y su relación con el porcentaje de arena o cemento, es posible establecer un gráfico que permita determinar, a partir de consideraciones prácticas, el espesor de la capa de base y del material asfáltico.

La figura 15 muestra un gráfico de doble entrada, dependiendo del tipo de estabilización del material (cemento o arena). Es posible obtener el espesor para diferentes índices de diseño que se han obtenido a partir de la categoría y el tipo de carretera.

El USACE recomienda un espesor mínimo (límite inferior) para el paquete base y material asfáltico de unos 13 cm. En la figura 15, se aprecia que para un índice de diseño unitario no se requieren muestras preparadas con porcentaje superior al 5% de arena. Mientras que para lograr el mismo nivel de espesor con mezclas de suelo-cemento se requiere un 7% (relación en peso). Las líneas de trazo sobre las curvas, que representan la relación entre porcentaje de cemento y espesor, indican la tendencia esperada para porcentajes incorporados de cemento superiores al 10%. Nótese que altos contenidos de cemento no implican bajos espesores

de base y material asfáltico, debido a los espesores mínimos especificados en la normativa.

Cuando la mezcla se realiza con arena, todos los índices de diseño provocan un colapso de las curvas en un punto de coordenada (0,05;60), debido al elevado nivel de CBR alcanzado por el material, quedando su diseño limitado por el mínimo de la figura 4 en espesores de 0,05 m.

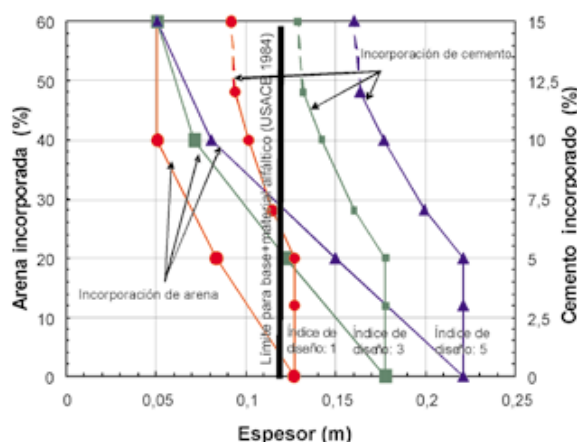


Figura 15. Relación entre espesor y porcentaje incorporado de arena y cemento a las mezclas

Adicionalmente, la figura 15 es de gran importancia ingenieril y colabora en la etapa de diseño o en la etapa de proyecto, pues permite establecer a priori el espesor de la base y del material bituminoso, cuando el suelo del sitio donde se ejecutará la carretera es limo-arenoso con las condiciones especificadas precedentemente y cuyas variaciones estén comprendidas en los límites estadísticos de índices y variables. También permite establecer la conveniencia entre diferentes alternativas de material en la estabilización. Así, donde el suelo granular resulta de abastecimiento complejo, se pueden obtener los porcentajes de cemento requeridos para lograr los espesores especificados durante el proyecto. Nótese que los índices de diseño son 1, 3 y 5, a pesar de lo cual, si la carretera posee otro valor de índice, la figura admite interpolación entre curvas.

CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado aspectos geotécnicos relacionados con el diseño y construcción de terraplenes destinados a obras de pavimento en carreteras o pistas de aeronaves. Se ha realizado un estudio experimental sobre el comportamiento mecánico de un suelo característico de la región central de Argentina, correspondiente a un limo-arenoso. Sobre el material compactado y mejorado mediante la incorporación de material granular del tipo de arena o material de estabilización (cemento) se han realizado ensayos CBR y de compresión no confinada.

Los resultados más relevantes obtenidos del análisis efectuado en este trabajo son:

- Las mayores resistencias mecánicas para una energía de compactación específica se obtienen cuando el material posee humedad óptima en el ensayo Proctor estándar.
- Las muestras presentan un notable incremento de resistencia con la adición de cemento o el aumento del porcentaje de arena.
- Para el paquete estructural del pavimento, resulta imprescindible conocer a priori la categoría de tránsito, el tipo de carretera y los índices de diseño.
- El espesor de base puede estimarse a partir de los porcentajes de cemento o arena incorporados al limo arenoso, analizando adecuadamente el comportamiento del material.
- Los contenidos de cemento superiores al 12% no aseguran disminución en el espesor del paquete base y carpeta asfáltica, limitado éste principalmente por cuestiones normativas.
- Para un índice de diseño unitario, no resulta necesario preparar el suelo con porcentaje superiores al 5% de arena y para lograr el mismo nivel de espesor con mezclas de suelo cemento se requiere un 7% (relación en peso).



- En investigaciones futuras se deberían implementar ensayos con el material saturado, a fin de evaluar el comportamiento del paquete estructural bajo una condición extrema de inundación o períodos de lluvia.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por la Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional y la Agencia Córdoba Ciencia, Gobierno de la Provincia de Córdoba, a través del Programa de Apoyo a Grupos de Reciente Formación. Las actividades se han desarrollado en el marco del Departamento de Ingeniería Civil UTN-FRC, al cual los autores le agradecen las facilidades y apoyo brindado. Los autores agradecen especialmente el apoyo otorgado por la Universidad Tecnológica Nacional.

BIBLIOGRAFÍA

- AIASSA, G. Comportamiento de barreras de limo compactado bajo condición de infiltración. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. N01/0693, 2006.
- ARRÚA, P. Teoría de probabilidad en el análisis del comportamiento de fundaciones profundas. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. N01/0690, 2006.
- ASTM. American Society for Testing and Materials. Annual Books of Standards, 2001.
- BOWLES, J. Foundation analysis and design. Third edition. McGraw-Hill, 1982.
- FOUNDATION ENGINEERING HANDBOOK. 2. ed. Hsai-Yang Fang (ed). Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.
- GUNEY, Y.; AYDILEK, A. and DEMIRKAN. Geoenvironmental behavior of foundry sand amended mixtures for highway subbases. Waste Management, Elsevier, 26:932-945, 2006.
- RODAS, V. Carreteras, calles y aeropistas. Caracas, Venezuela. 2. ed., 1954.
- USACE. Airfield flexible pavement mobilization construction. EM 1110-3-141, 1984.
- USACE. Flexible pavements for roads, streets, walks, and open storage areas. EM 1110-3-131, 1984.
- USACE. Geometrics for roads, streets, walks, and open storage areas. EM 1110-3-130, 1984.

